



Fontenay-aux-Roses, le 27 juillet 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00122

Objet : Réacteurs électronucléaires EDF – Tous paliers – Instruction des suites du GP relatif aux critères de tenue du combustible – Deuxième avis

Réf. : [1] Lettre ASN – CODEP-DCN-2023-042304 du 24 juillet 2023.
[2] Lettre ASN - CODEP-DCN-2014-001304 du 28 janvier 2014.
[3] Avis IRSN – 2017-00168 du 22 mai 2017.
[4] Lettre ASN – CODEP-DCN-2019-010454 du 27 mai 2019.
[5] Avis IRSN – 2021-00159 du 24 septembre 2021.

Conformément à la demande formulée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en référence [1], l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné l'acceptabilité des réponses apportées par EDF aux demandes formulées par l'ASN dans le cadre de la revue des critères de tenue du combustible des réacteurs à eau pressurisée (REP) initiée depuis 2014.

1. CONTEXTE

Dans les REP, la gaine des crayons de combustible constitue la première barrière séparant la matière radioactive de l'environnement. Les études déterministes des conditions de fonctionnement de référence visent à démontrer le respect de critères techniques d'acceptation, notamment ceux relatifs au comportement de la première barrière et, plus généralement, du combustible.

Ces critères techniques portent sur des grandeurs représentatives des phénomènes physiques limitatifs, accessibles par le calcul ou mesurables en réacteur. Les valeurs limites sont déterminées sur la base d'expérimentations représentatives des situations rencontrées dans les conditions de fonctionnement de référence¹.

Une grande partie des critères retenus en France par EDF est issue du référentiel de sûreté américain datant des années 1970. Certains compléments ont été apportés depuis, notamment pour tenir compte des évolutions des conditions d'exploitation des réacteurs et des crayons de combustible (type de pastille et de gainage). Toutefois, la majorité d'entre eux n'avait pas été revue depuis la conception du parc électronucléaire d'EDF, à l'exception

¹ Ces critères sont d'autant plus sévères que la fréquence estimée des conditions de fonctionnement est élevée. Ces dernières sont classées en quatre catégories comprenant le fonctionnement normal (catégorie 1), les transitoires incidentels (catégorie 2), les transitoires accidentels improbables (catégorie 3) et enfin les transitoires accidentels hypothétiques (catégorie 4).

de ceux concernant l'accident de perte de réfrigérant primaire² (APRP) qui ont évolué à la suite de l'examen mené entre 2010 et 2014 et visant à prendre en compte l'état des connaissances sur le sujet. C'est pourquoi l'ASN avait demandé [2] que soit réalisé un réexamen ciblé de la pertinence des exigences et des critères relatifs à la tenue du combustible, dans le cadre de la préparation d'une réunion du Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires (GPR) qui s'est tenue le 17 juin 2017 (dit GPR « Critères de tenue du combustible »). L'objectif de l'expertise était, notamment, de se prononcer sur l'exhaustivité et la pertinence des critères, en fonction de l'état des connaissances, afin de compléter, si besoin, la démonstration de sûreté des réacteurs français.

À l'issue de l'expertise présentée par l'IRSN lors de la réunion du GPR « Critères de tenue du combustible » [3], l'ASN avait formulé plusieurs demandes dans la lettre en référence [4].

Un premier avis de l'IRSN [5] s'est attaché à analyser les réponses apportées par EDF portant sur les critères relatifs à l'interaction mécanique entre la pastille et la gaine (ImPG) retenus pour l'étude de l'accident d'éjection de grappe (EDG) et leur vérification dans le cadre des rapports de conception thermomécanique des crayons de combustible, d'une part, et les critères relatifs à l'oxydation à haute température des gaines en transitoire accidentel (hors APRP), d'autre part.

L'ASN souhaite à présent recueillir l'avis de l'IRSN sur les réponses aux demandes et actions n'ayant pas encore été expertisées. Ainsi, en réponse à la lettre de l'ASN en référence [1], l'expertise de l'IRSN porte sur :

- la qualification d'une nouvelle version de l'outil de calcul scientifique (OCS) d'évaluation de la thermomécanique d'un crayon de combustible en transitoire de puissance rapide, OCS utilisé dans la démonstration de sûreté ;
- la robustesse de la démarche d'analyse thermomécanique pour le transitoire de retrait incontrôlé de groupe(s) de grappes de commande initié à puissance nulle (RIGZ) ;
- la démonstration de sûreté en cas de présence de crayons inétanches lors d'un transitoire d'EDG.

2. QUALIFICATION D'UNE NOUVELLE VERSION DE L'OCS D'ÉVALUATION DE LA THERMOMÉCANIQUE D'UN CRAYON DE COMBUSTIBLE EN TRANSITOIRE DE PUISSANCE RAPIDE

La simulation du comportement thermomécanique d'un crayon de combustible soumis à une sollicitation par ImPG en transitoire de puissance rapide de type RIA (*Reactivity initiated accident*) est réalisée par EDF à l'aide d'un outil de calcul réaliste³. Cet outil de calcul est utilisé dans la démonstration de sûreté pour :

- évaluer les variations d'enthalpie issues de l'interprétation de la base expérimentale d'essais semi-intégraux de type RIA pour définir des critères en transitoire d'EDG initié à puissance nulle ;
- évaluer la déformation circonférentielle de la gaine en transitoires d'EDG (initiés à puissance nulle ou non nulle) ;
- démontrer le respect du critère en déformation circonférentielle plastique de la gaine en transitoire de RIGZ.

Lors du GPR « Critères de tenue du combustible » [3], la qualification de la version de l'OCS utilisée, par EDF, pour interpréter les essais retenus afin de définir de nouveaux critères en EDG pour le combustible UO₂, avait été jugée satisfaisante.

² L'APRP est un des accidents retenus pour le dimensionnement des systèmes de sauvegarde d'un REP. Il correspond à la rupture d'une tuyauterie principale du circuit primaire.

³ Un calcul réaliste est un calcul se rapprochant au mieux des résultats expérimentaux. *A contrario*, on parle de calcul enveloppe lorsque celui-ci est pénalisé dans le but de réaliser des études conservatives.

Cette version ne permettant que la modélisation du crayon de combustible UO_2 , une évolution majeure de l'OCS a été réalisée afin de modéliser également les crayons de combustible MOX. EDF utilise donc cette nouvelle version pour la démonstration de sûreté relative à l'EDG et au RIGZ.

À l'issue de son expertise de la qualification de cette nouvelle version, l'IRSN constate que la base de validation a été complétée et que la prédiction des déformations circonférentielles plastiques de la gaine par ImPG est améliorée dans la gamme de déformations attendues dans les études de sûreté, ce qui est satisfaisant. En revanche, EDF n'a pas fourni de quantification de l'incertitude globale associée à l'utilisation de l'OCS, quantification pourtant préconisée par le guide n° 28 de l'ASN portant sur la qualification des OCS utilisés dans la démonstration de sûreté pour la première barrière du combustible. **À cet égard, EDF s'est engagé à apporter à moyen terme des compléments, ce que l'IRSN estime satisfaisant.** Nonobstant, lorsque les incertitudes ne sont pas déterminées, des hypothèses particulières doivent être retenues dans les méthodes d'étude afin d'assurer le caractère conservatif des valeurs des grandeurs d'intérêt. La vérification du caractère conservatif de la démarche d'étude du RIGZ, reposant sur cet OCS, est présentée au §3.

Par ailleurs, pour ce qui concerne l'évaluation de la déformation circonférentielle de la gaine, les transpositions réalisées à partir du domaine de validation pour définir le domaine de validité⁴ n'ont pas été justifiées. Au cours de l'expertise, EDF a alors indiqué qu'il apportera les justifications adéquates lors de la prochaine révision des notes de qualification de l'OCS. **Si l'IRSN estime cet engagement satisfaisant, il souligne que, dans l'attente, l'utilisation de cet OCS devrait être limitée à l'étude de transitoires dont les caractéristiques (énergie injectée, taux de combustion, ...) sont incluses dans le domaine de validation. Dans le cas contraire, EDF devra transmettre, en complément de ces études, les éléments de transposition adéquats.**

En outre, un outil en support à la démonstration de sûreté est utilisé afin de constituer les jeux de données des calculs de l'OCS. Afin de limiter le risque d'erreurs dans les jeux de données, l'IRSN estime qu'un manuel d'utilisation de cet outil devrait être rédigé, ce à quoi EDF s'est engagé.

En conclusion, l'IRSN estime l'exploitation de la nouvelle version de l'OCS acceptable pour les études d'ImPG en transitoires d'EDG et de RIGZ. En revanche, l'IRSN considère qu'à ce stade la qualification de l'OCS n'est acquise que dans son domaine de validation, dans l'attente des compléments de justification qu'EDF s'est engagé à apporter. EDF s'est également engagé à rédiger une note de qualification intégrant les éléments transmis au cours de l'expertise et les conclusions de celle-ci, ce que l'IRSN estime satisfaisant.

3. ROBUSTESSE DE LA DÉMARCHE D'ANALYSE THERMOMÉCANIQUE POUR LE TRANSITOIRE DE RIGZ

Le RIGZ est un transitoire de catégorie 2 conduisant à une excursion rapide de puissance générant un risque de rupture de la gaine par ImPG. Dans le cadre du GPR « Critères de tenue du combustible », EDF avait défini une limite en déformation circonférentielle plastique de la gaine pour garantir l'absence de rupture de celle-ci pour ce transitoire, ce que l'IRSN avait estimé acceptable [3].

Par ailleurs, la démarche d'analyse thermomécanique pour le transitoire de RIGZ a fait l'objet d'une première application dans le cadre du 4^{ième} réexamen périodique (RP4) des réacteurs de 900 MWe, qui n'a pas appelé de remarque particulière sous réserve de la qualification de la nouvelle version de l'OCS simulant le comportement thermomécanique d'un crayon de combustible lors d'un transitoire de puissance rapide. Or, comme indiqué au §2, la quantification des incertitudes n'est à ce jour pas disponible. Par ailleurs, l'analyse des résultats de calcul par comparaison aux résultats expérimentaux montre une sous-estimation de la déformation de la gaine pour

⁴ Le domaine de validité résulte de l'adaptation éventuelle, à l'issue de l'étape dite de transposition, du domaine de validation en vue de l'application visée, le domaine de validation étant défini comme le domaine de variation des grandeurs caractéristiques géométriques ou physiques (pression, température, débit, puissance, etc.) pour lequel les résultats de l'OCS sont jugés satisfaisants.

certaines essais de la base de validation de l'OCS. En conséquence, la démarche d'analyse thermomécanique des transitoires doit garantir un niveau de conservatisme suffisant comme préconisé par le guide n° 28 de l'ASN.

Pour le combustible UO_2 , cette démarche d'analyse retient une pénalisation sur les paramètres les plus influents en lien avec le comportement thermique du combustible. Pour justifier la robustesse de la démarche, EDF a appliqué cette pénalisation à certains essais de la base de validation de la nouvelle version de l'OCS pour lesquels la déformation de la gaine est sous-prédite, puis a comparé les résultats de calcul de la déformation de la gaine pénalisée aux valeurs mesurées expérimentalement. **Cette vérification apportée pour le combustible UO_2 permet de montrer que cette pénalisation est suffisante, ce qui est satisfaisant.**

Par ailleurs, EDF s'est engagé à mener une réflexion pour justifier la transposabilité et la suffisance de l'analyse réalisée sur le combustible UO_2 pour le MOX. Dans l'attente, EDF prévoit d'appliquer, dans le cadre des études concernées du RP4 des réacteurs de 1300 MWe, une pénalisation spécifique supplémentaire sur chacun des paramètres influents, à l'image de ce qui a été réalisé pour les études associées au RP4 des réacteurs de 900 MWe. **L'IRSN estime acceptable l'engagement d'EDF ainsi que les pénalisations retenues pour le combustible MOX.**

4. DÉMONSTRATION DE SÛRETÉ EN CAS DE PRÉSENCE DE CRAYONS INÉTANCHES LORS D'UN TRANSITOIRE D'EDG

La prise en compte de la présence en cœur de gaines inétanches⁵ a fait l'objet d'une expertise dans le cadre du GPR « Critères de tenue du combustible ». L'accident d'EDG a alors été retenu dans la mesure où ce transitoire conduirait à la rupture des gaines inétanches et à l'expulsion, dans le réfrigérant primaire, de combustible chaud et fragmenté ainsi que de gaz chauds et pressurisés. Cette expulsion provoquerait une interaction thermique avec le fluide primaire situé autour du crayon de combustible rompu. Cette interaction thermique, simulée à l'aide d'un OCS spécifique, génèrerait un pic de pression du fait de la vaporisation locale mais brutale du fluide primaire qui se propage sous la forme d'une onde de pression ayant pour conséquences :

- une sollicitation d'ordre mécanique sur les crayons voisins du crayon rompu, mettant potentiellement en cause leur tenue (effet dit *domino mécanique*). Les éléments de la cuve seraient, eux, également sollicités mécaniquement du fait d'un effet cumulé de la rupture de l'ensemble des crayons inétanches ;
- une sollicitation d'ordre thermique, supplémentaire à celle de l'EDG, pour les crayons voisins du crayon rompu, consécutive à la formation d'une poche de vapeur altérant leur refroidissement et mettant en cause leur tenue (effet dit *domino thermique*).

Bien que, lors du GPR « Critères de tenue du combustible », l'IRSN ait indiqué qu'il estimait que la démonstration d'EDF prenait en compte de manière globalement satisfaisante l'état des connaissances concernant les phénomènes résultant de la rupture d'un crayon inétanche, il avait toutefois formulé deux recommandations, suivies de demandes de l'ASN [4]. La première demande de l'ASN était relative à certains choix de modélisation portant notamment sur la quantité d'énergie du combustible cédée au réfrigérant lors de l'interaction thermique. La seconde demande de l'ASN était relative à la justification des conséquences de la dégradation des échanges thermiques sur la tenue des crayons voisins du crayon rompu dans des conditions représentatives d'un REP.

⁵ Certains crayons de combustible peuvent perdre leur étanchéité en fonctionnement normal, notamment à cause de la présence d'un corps migrant dans le circuit primaire ou d'un défaut de conception ou de fabrication.

Par ailleurs, à l'issue de l'expertise de l'IRSN, EDF s'était engagé à apporter des éléments concernant :

- l'influence de la température interne du crayon inéteanche au moment de la rupture en transitoire d'EDG sur les caractéristiques du pic de pression ;
- la délimitation de la zone d'évolution de l'onde de pression, c'est-à-dire le nombre de rangées de crayons autour du crayon rompu⁶ qu'il est nécessaire de considérer ;
- les différents conservatismes retenus dans l'évaluation de l'interaction thermique ;
- la validation de l'approche proposée pour l'évaluation de l'effet *domino mécanique* ;
- l'atténuation de l'onde de pression entre la zone d'interaction thermique et la cuve du réacteur.

Concernant la modélisation de l'interaction thermique, l'évaluation de l'amplitude et de la durée du pic de pression résultant de l'interaction thermique repose sur un ensemble d'hypothèses dont la justification ne peut être formellement apportée du fait de l'absence de donnée expérimentale. Ceci a conduit EDF à justifier l'acceptabilité de la méthodologie retenue en démontrant le caractère pénalisant ou l'impact modéré des différentes hypothèses retenues. **À l'issue de l'expertise, l'IRSN estime que la modélisation du pic de pression est robuste vis-à-vis (i) du choix de la température interne du crayon au moment de la rupture en transitoire d'EDG et (ii) du nombre de rangées de crayons autour du crayon rompu considéré dans la modélisation.** En revanche, certains choix de modélisation induisent des biais qui peuvent conduire à une sous-estimation de l'énergie reçue par le réfrigérant. **Nonobstant, l'IRSN estime que, d'une manière globale, l'ensemble des conservatismes permet de couvrir les biais de modélisation identifiés.**

Par ailleurs, au cours de l'expertise, EDF a indiqué qu'un programme de recherche et de développement (R&D) a été initié en 2021 visant, notamment, à mettre en œuvre une modélisation plus réaliste de l'interaction thermique. **L'IRSN estime que ces travaux de R&D devraient participer à garantir la robustesse de la démonstration de sûreté actuelle. Aussi, un bilan des avancées de ce programme de R&D et, à terme, une analyse de ses conclusions, devront être présentés à l'ASN et l'IRSN.**

Concernant l'effet *domino mécanique*, EDF considère désormais une modélisation géométrique plus représentative des crayons de combustible par rapport à la modélisation simplifiée initiale. De plus, EDF a réalisé une analyse de sensibilité aux paramètres matériaux qui permet de consolider les conclusions de l'étude. **À l'issue de l'expertise, l'IRSN estime que les éléments transmis sont satisfaisants et permettent d'écarter l'effet *domino mécanique*.**

Concernant la sollicitation mécanique de la cuve, EDF a fait évoluer la méthodologie de calcul de la surpression appliquée, considérant une approche plus réaliste que l'approche simplifiée initiale, jugée très pénalisante. Par ailleurs, EDF évalue cette sollicitation en considérant l'effet cumulé de la rupture simultanée de deux crayons. Les marges au regard des critères de tenue de la cuve sont importantes. **À l'issue de l'expertise, l'IRSN estime que l'hypothèse de deux crayons inéteanches pouvant rompre simultanément couvre raisonnablement le retour d'expérience d'exploitation et que la nouvelle méthodologie d'EDF est satisfaisante.**

Concernant l'estimation de l'effet *domino thermique*, EDF a évalué de manière simplifiée mais enveloppe l'altération du refroidissement induite par l'interaction thermique. Celle-ci concerne plusieurs rangées de crayons voisins du crayon rompu. EDF a en outre transmis au cours de l'expertise une analyse de résultats expérimentaux visant à justifier la tenue d'un crayon à cette sollicitation thermique. **L'IRSN estime que les éléments apportés sont pertinents et permettent d'exclure l'effet *domino thermique*.**

⁶ Un assemblage de combustible des réacteurs en exploitation est constitué de 264 crayons de combustible, 24 tubes guides et un tube d'instrumentation (au centre) organisés en rangées de 17x17 éléments. Ainsi, un crayon est entouré de plusieurs rangées de crayons voisins.

En conclusion, l'IRSN estime que les éléments présentés par EDF permettent de répondre aux demandes de l'ASN et aux engagements pris lors de l'expertise précédente. L'IRSN note que la démonstration de sûreté en cas de présence de crayons inétanches lors d'un transitoire d'EDG a ainsi fait l'objet de nombreuses évolutions au cours des différentes expertises. **En conséquence, l'IRSN estime qu'il serait pertinent qu'un document complet et autoportant reprenant ces éléments soit rédigé, ce à quoi EDF s'est engagé.**

5. CONCLUSION

Les études des conditions de fonctionnement du domaine de dimensionnement visent notamment à démontrer le respect de critères techniques d'acceptation portant sur la tenue du combustible. Ces critères ont été définis au moment du démarrage du programme nucléaire français sur la base des connaissances de l'époque. Depuis les années 2010, EDF a effectué une revue conséquente de l'ensemble des critères relatifs au comportement du combustible qui a fait l'objet de plusieurs expertises.

Dans le présent avis, l'IRSN a analysé les compléments apportés par EDF à la suite du GPR « Critères de tenue du combustible » concernant la qualification d'une nouvelle version de l'OCS permettant de simuler le comportement thermomécanique d'un crayon de combustible lors d'un transitoire de puissance rapide, la démarche d'analyse thermomécanique pour le transitoire de RIGZ ainsi que les conséquences de la présence de crayons inétanches sur la démonstration de sûreté pour l'accident d'EDG. L'IRSN estime ces éléments acceptables compte tenu des engagements pris par EDF au cours de l'expertise.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté